

CMOS 图象传感器技术及其 研究进展*

林凡, 吴孙桃, 郭东辉

(厦门大学技术物理研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: 简要介绍了图象传感器的技术原理, 比较了 CCDs 和 CMOS 图象传感器的技术特点。通过了解单片 CMOS 图象传感器的系统结构功能与器件类型, 分析了单片 CMOS 图象传感器的性能要求与技术难点, 总结出了提高性能所要进一步研究的关键问题。

关键词: 图象传感器; 片上系统; CMOS

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X(2001)12-0040-05

Technology of CMOS image sensor and its research progresses

LIN Fan, WU Sun-tao, GUO Dong-hui

(Technology Physics Institute, Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper introduces the basic technology of CMOS image sensor, and outlines the differences between CCDs and CMOS image sensor. With reviewing the system function and the types of CMOS image sensor, we analyze the technology difficulties and performance requirements of single-chip CMOS image sensor. And the key technologies for further improvement are concluded at last.

Keywords: image sensor; system on a chip; CMOS

1 引言

图象传感器作为一种基础器件, 因能实现信息的获取、转换和视觉功能的扩展, 并能给出直观、真实、层次多、内容丰富的可视图象信息, 而在现代社会中得到了越来越广泛的应用, 如汽车应用、监督系统、玩具、视频会议、指纹识别系统、冲突避免系统、增强型自适应巡航控制、带相机的移动电话和医学图象识别等等。

60年代以前, 摄像是用各种电子束摄像管来实现, 60年代后期, 各种固态图象传感器得到了迅

速的发展。固态图象传感器主要分为两类: 一类是电荷耦合式图象传感器 (CCDs), 它从 70 年代开始就一直在图象传感领域占据支配地位, 如今在市场上依然保持优势; 另一类是 CMOS 图象传感器, 它在 60 年代就出现, 但因其性能差, 像素面积相对较大而没有被当时的市场所接受。从 90 年代初开始, 亚微米 CMOS 工艺的实用性、CMOS 制造工艺的成熟和低噪声有源像素传感新概念的出现, 都促成了现今高性能 CMOS 图象传感器的迅速发展。

在未来的电子消费市场里, 人们需要的是一种高分辨率、高速、低功耗、低成本、小型化和高集成数字式的图象系统。而 CCDs 存在一些自身技术无法克服的缺点, 因此, 尚未成熟但是更有发展

* 国家自然科学基金项目 (No: 69886002、60076015) 和福建省科技项目基金的资助

空间的 CMOS 图象传感器设计日益得到人们的重视。为了有助于了解 CMOS 图象传感器的未来发展方向,以及帮助我们在这方面做进一步研究,本文介绍了 CMOS 图象传感器的基础、发展现况、性能要求与技术难点,以及进一步研究的关键问题。

2 技术原理

图象传感系统首先通过透镜收集并聚焦来自目标的反射光线,将之投射于光检测器阵列上,在像素阵列中光信号被转换为电信号,并经过信号处理电路,最后以模拟信号或数字信号输出。

为要产生彩色图象,可在像素表面覆盖彩色光滤阵列(CFA),即在每个像素表面覆盖一个独立的滤波器,这样在随后的信号处理中就可实现修复和重建彩色图象,其中较为普遍的一种模式是红绿蓝模式。此外,还使用微透镜把入射到像素非敏感区的光集中射到像素敏感区,把有效填充系数提高 2 到 3 倍^[1]。微透镜是通过制备一层聚合物薄膜或刻蚀沉积在芯片上的玻璃来实现的。

CCD 和 CMOS 两种固态图象传感器的基本共同点是在光检测方面都利用了硅在光照下的光电效应原理,而且都支持光敏二极管型和光栅型。基本不同点是像素里光生电荷的读出方式不同。CCDs 是用时序电压输入邻近电容把电荷从积累处迁移到放大器里,因此这种电荷迁移过程导致一些根本缺点:必须一次性读出整行或整列的像素值,不能提供随机访问;需要复杂的时钟芯片来使时序电压同步,需要多种非标准化的高压时钟和电压偏置;CCDs 的硅处理专用制作工艺与现今微电子器件的主流制作工艺不同;无法低成本地把控制处理电路集成在同一图象芯片上,这也就造成了基于 CCD 的图象系统体积庞大和功耗大(CCD 便携式照相机功耗近 10W)。而 CCD 在市场上能保持优势的原因是它的出色的分辨率、较高的动态范围、一致性好、低噪声和像素面积小。在 CMOS 传感器中,积累电荷不是转移读出,而是立即被像素里的放大器所检测,通过直接寻址方式读出信号。CMOS APS 的主要优势是低成本、低功耗(比 CCDs 低 100 到 1000 倍)、简单的数字接口、随机访问、运行简易(单一的 CMOS 兼容电源供给)、高速率(可大于 1000 帧/秒)、通过系统集成实现小型化(比

CCDs 小 10 到 100 倍),以及通过片上信号处理电路实现一些智能功能。

随着 CMOS 工艺和大规模集成电路的发展,以及亚微米平版印刷术、高级信号处理算法的出现,CMOS 图象传感器相对于 CCDs 的优势越来越被人们所认识,成为成像领域的一个重要研究课题。

3 结构和类型

90 年代初 CMOS 传感器开始被部分市场所采纳,一个重要原因就是它可以在同一个芯片上集成各种信号和图象处理模块,如运放器、ADCs、彩色处理和数据压缩电路、标准 TV 和计算机 I/O 接口,形成一个单片集成数字成像系统。图 1 是一种 CMOS 图象传感器芯片的结构框图,它一般由光敏像素阵列、行选通译码器、列选通译码器、定时控制电路、模拟信号处理电路、模/数转换器(ADC)、存储器与读出译码器构成,其中定时控制电路用来限制信号读出模式、设定积分时间以及控制数据输出率。模拟信号处理器包括信号的积分、放大、取样和保持,目的是在图象信号离开传感芯片之前就消除噪声(其中一个原因是消除噪声的模拟电路所占的面积比数字电路小)。

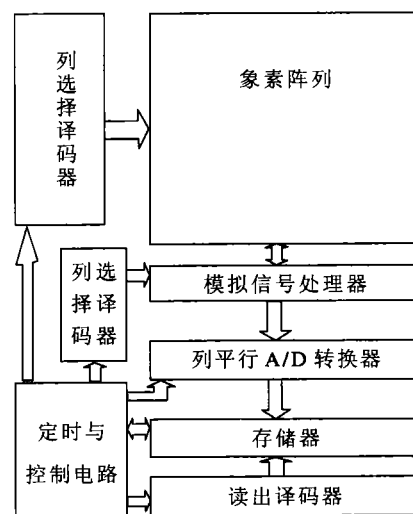


图 1 CMOS 图象传感器芯片结构框图

CMOS 图象传感器主要分为两种类型:无源像素图象传感器和有源像素图象传感器。

(1) 无源像素图象传感器(PPS)

60年代Reticon提出PPS, 80年代Hitachi和Matsushita进一步研究它在可携式照相机上的使用, 90年代初VLSI Vision和90年代末的Omnivision都生产出应用于电子仪器中的CMOS PPS器件^[2]。PPS的结构如图2, 当开关Tx打开后, 光敏二极管PD里面的积累电荷流入列读出线中, 在列线末端有一个放大器, 它把检测到的电荷转化为电压。

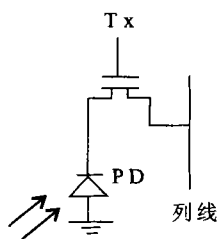


图2 光敏二极管型无源像素结构

PPS结构简单、填充系数高（有效光敏面积和单元面积之比），由于填充系数大及没有覆盖一层类似于在CCDs中的硅栅层，因此量子效率（积累电子与入射光子的比率）非常高。但是它的读出噪声非常大，主要是固定噪声（FPN），一般250个方均根，而商业型CCDs的读出噪声可低于20个方均根。而且PPS不利于向大型阵列发展，很难超过 1000×1000 ，不能有较快的像素读出率，这是因为这两种情况都会增加线容，若要更快地读出就会导致更高的读出噪声。为解决PPS的噪声问题，OmniVison的OV5006产品通过在芯片上集成模拟信号处理来减少FPN，达到很好的效果^[3]。还有Fujimori IL等人在2000年IEEE出版的文章中提出一种无源像素图像传感器，用一个双关取样电路的列并行微分结构来消除寄生电流的影响，实现了0.1%的像素间固定噪声和0.4%的列间固定噪声^[4]。

(2) 有源像素图像传感器(APS)

1992年美国喷气推进实验室(JPL)开始发展和支持有源像素传感器在太空上的应用，后来一些美国公司也加入了有源像素传感器的研究，如Kodak、Motorola、Lucent、National Semiconductor、Intel和Hewlett-Packard^[2]。有源像素传感器主要有光敏二极管型(PD-APS)和光

栅型(PG-APS)两种类型。图3是光敏二极管型有源像素结构，该结构在像素里引入至少一个晶体管，实现信号的放大和缓冲，来改善PPS的噪声问题，并允许更大规模的图像阵列。起缓冲作用的源跟随器可加快总线电容的充放电，因而允许总线长度的增长，增大阵列规模。另外像素里还有复位晶体管（用来控制积分时间）和行选通晶体管。虽然晶体管数目增多，APS像素和PPS像素的功耗相差并不大。光栅APS是以PD-APS为基础在像素里增加了噪声控制，因此也增加复杂性和影响了填充系数。Photobit的PG-APS产品的读出噪声只有5个方均根，而一般PD-APS的读出噪声为100个方均根。PD-APS常用于中低性能应用，PG-APS用于高性能科学应用和低光照应用。

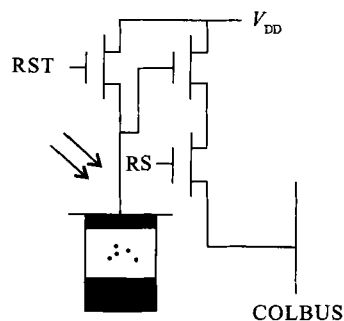


图3 光敏二极管型有源像素结构

通常有源像素传感器比无源像素传感器有更多的优点，包括低读出噪声、高读出速度和能工作在大型阵列中。但是由于像素和晶体管数目的增多，恶化了阈值匹配和增益一致性，引发了固定噪声问题，而且填充系数也变小（20%到30%）。为解决填充系数的问题，APS引进CCDs的微透镜技术，使有效填充系数增为原来的2至3倍。为解决固定噪声问题，1993年NASA通过采用双关取样(CDS)，消除了像素信号里的部分固定噪声和相关的瞬态噪声，在CMOS图像传感器方面取得了显著的进步^[5]。

有源像素还有其他特殊结构，如对数传输型、针扎光敏二极管型、浮栅放大器型等等^[6]。在考虑灵敏度、噪声、像素大小以及线性度的情况下，每种类型都有各自的优缺点，我们要根据不同的应用做出不同的选择。

4 技术难题及解决方案

CMOS 图像传感器的部分性能仍有不及 CCDs 之处, 人们解决了众多的技术难题以求提高 CMOS 图像传感器的性能, 以合理的成本减少 CMOS 和 CCD 成像性能的差距, 使之在许多应用领域替代 CCD。

近两三年来 CMOS 图像传感器在高速成像方面有了突破性的进展。像素值的并行读出可以允许非常高的数据读出速率, 而关键问题是数据如何多路输出到外接口。由于数字数据的多路读出比模拟数据简单得多, 所以解决方法是数据在输出要先数字化。在大规模高速率图像传感器中, 列并行 ADC 结构非常有效, 可有利于信号的高速转移和提高帧速。这种 ADC 有一定的特殊性能要求, 必须支持视频速率的数据, 分辨率至少要达到 8 位, 有较低的积分非线性 (INL) 和微分非线性 (DNL), 功耗要很小 (典型的是在 100mW 以下), 而且不能因衬底耦合和道间串扰给模拟成像部分带来噪声。允许高速运作的另一个结构特点是数字数据的读出与模数转换的同步。这看似简单, 但是在实际操作中必须注意减少噪声数字数据路径和敏感模拟节点的互相干扰。现在 CMOS 技术在两个前沿获得突破: 用于计算机和手提电话的低档产品和超高速、大规格的高档产品。从根本上说, 考虑到视频速率下的读出噪声和灵敏度问题, CMOS 图像传感器比 CCDs 更有优势, 有着更低的瞬态噪声, 而且这个优势随着像素数目的增大而更加明显。最近设计的高速 CMOS APS 能实现 2368×1728 分辨率下的 240 帧/秒的帧速, 1280×1024 下的 600 帧/秒帧速^[7]。

在图象领域里, 动态范围是个众所周知的难题, 且已经提出了各种各样的方法, 如多次适当调节电容; 芯上光电流的对数压缩; 芯上空间差异的编码; 芯上时间差异的编码; 采用双路或多路积分时间; 对同时读出但曝光时间不同的两个图象进行合成; 顺序采集两个图象; 依据光照强度来自动调节积分时间; 依据光强分类进行图象的理论信息优化编码。现今高动态范围 CMOS 图像传感器的动态范围可在 1:1000000 左右^[8]。

有源像素传感器的缺点是相对高的固定噪声。

APS 的每个像素中有一个放大器, 由于制造工艺偏差导致实际放大器的增益和偏置都有偏差存在, 就是这种偏差引起了大部分的 FPN。传统解决策略是在信号数字化之前进行模拟信号处理, 其中的双关取样处理, 利用去除在时间上非常接近的两次取样值的差值, 消除信号中 dc 偏移成分, 并减小来自晶体管的 $1/f$ 噪声, 还可以减小复位噪声。另外人们还考虑在像素里放入相同增益的放大器 (UGA), 但是相同增益的放大器需要 6 个或更多的场效应管, 造成像素的填充系数大大减小, 设备复杂度和成本增加。最近, Jeff Zarnowski 和 Matt Pace 提出, 每个像素的 UGA 里除了作输入的场效应管以外的所有管子都是多余的, 这些多余的场效应管可用每列共享的一个 UGA 放大器来代替^[9]。把新的 UGA 应用和改良的 CDS 电路相结合来消除偏差, 减小固定噪声, 使得 CMOS 图像传感器获得新生。

值得关注的是在光学传感阵列上的最新发展, 出现了不同于传统 CFA 模式的一种新的彩色传感阵列模式 TFA。传统 CCD 和 CMOS 技术的噪声和温度漂移都较大, 而且填充系数受到限制。在 ASIC 上加一层薄膜, 即三维集成一层硅探测器的方法 (TFA) 是解决这个问题新途径。像素电路和光探测被分开设计和优化, 填充系数可接近 100%, 在高分辨率下能有较大的动态范围 ($>100\text{dB}$) 色谱^[10]。这种建于无定形硅上的彩色检测器已建成了成熟工艺。

另外人们已经考虑把完全损耗 SOI CMOS (FDSOI) 和高性能的 CCD 图像传感器进行单块集成, 这种方法既有了 FDSOI 的优点 (快速、低功耗和潜在增强的辐射性能), 又有了 CCD 的高量子效率、低噪声和结构灵活的优点^[11]。

在医学应用领域, 1998 年 IEEE 国际固体电路会议上, Photobit 的一篇文章是关于一种 CMOS 牙齿 x 射线芯片, 这个芯片是放在病人的口中来检测 x 射线辐射, 并合成图象^[12]。2000 年还提出用 CMOS 图像传感器和一个微电子激励器实现一种视网膜植入系统, 这个系统用电子激励为有感光恶化的病人提供视觉感觉^[13]。

在工艺方面, 在深亚微米工艺里实现 CMOS 成像器也有遇到问题。CMOS 图像传感器的加工生产

和专用集成电路(ASIC)类似,但它不能像ASIC加工那样一味地追求芯片面积的减小。实现亚微米MOSFETs时所需的损耗长度的减小以及外延硅厚度的减小,都将导致量子效率的减小,并增加光生载流子采集的像素间相互干扰的几率,而且硅层厚度也会因太小而不能提供足够的可见光光谱的光子吸收。面积的减小对逻辑电路有益,但对像素结构不利,过小的像素意味着光灵敏度和动态范围的减小。

5 结论

如今很多的商业焦点集中在多媒体图象捕获的市场,这个市场预计在近几年内将领导着商业型CMOS图象传感器的发展。当然其它应用领域也在开发,包括汽车应用、安全监视、机器视图和玩具等等。

CMOS传感器与已有的高级CCD传感器相比成像性能依然略差些。所以研究方面的主要目的是继续提高CMOS图象传感器的各方面综合性能,包括提高成像速度,改进图象质量,提高灵敏度和分辨率,缩小单元尺寸,降低成本,降低功耗,实现多种支持电路与图象传感阵列的高度集成,并在CMOS图象传感器的加工生产上进一步提高兼容模拟电路的能力,完善制作彩色过滤和微透镜沉积的工艺。而另一方面,CMOS有源像素传感器的成像性能从根本上是在设备级被限制,而不是在结构级或是电路级。所以要支持图象传感器设计有必要对标准CMOS制造工艺引入一些修正,尤其是可以发展一些在CCD传感器上采用的技术如表面针插技术和channel stop技术^[14]。工艺修正和提高电路性能结合,就能用合理的成本来减少CMOS和CCD成像质量的差距。由于CMOS成像技术的低功耗和与照相系统集成的兼容性,它将在许多应用领域替代CCD,单芯片CMOS图象系统在未来几年里将会有更大的发展。

参考文献

- 1 Ishihara Y, Tanigaki K. A high sensitivity IL-CCD Image sensor with monolithic resin lens array. IEEE Int' l Electron Devices Conf, Digest of Tech Papers IEEE Piscataway N J, 1983; 497~500

- 2 Fossum E R. Digital camera system on a chip. IEEE MICRO MAY-JUNE 1998; 0272-1732/98, 8~14
- 3 Kempainen S. COMS image sensor:Eclipsing CCDs in visual information.10.09.97 File:///F:/share/0224/CCD-CIS.html
- 4 Fujimori I L, Wang C C, Sodini C G. A 256×256 CMOS differential passive pixel imager with FPN reduction techniques. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000; 35 (12): 2031~2037
- 5 Mendis S, Kemeny S, Fossum F R. A 128×128 CMOS active pixel image sensor for highly integrated imaging systems. IEEE Int' l Electron Devices Conf Digest of Tech Papers, IEEE Piscataway N J. 1993 ;583~586
- 6 赵文伯, 刘俊刚. CMOS 图象传感器发展现状. 半导体光电, 1999; (1)
- 7 Fossum E, Krymski A. HIGH SPEED CMOS IMAGING. 0-7803-6252-7/00/\$10.00©000 IEEE
- 8 Brajovic V M, Miyagawa R, Kanade T. Temporal photoreception for adaptive dynamic range image sensing and encoding. Neural Networks, 1998; 11:1149~1158
- 9 Zarnowski J J, Pace M, Joyner M. 1.5 FET-per-pixel standard CMOS active column sensor. Proceedings of SPIE, 2000; 3649~27
- 10 Rieve P, Sommer M, Wagner M, et al. a-Si : H color imagers and colorimetry. Journal of Non-Crystalline Solids, Part B 2000; 266: 1168~1172
- 11 Suntharalingam, Burke B E, Chen C K. Massachusetts institute of technology lexington MA 02420-9108. SOI Wafer Selection for CCD/SOI-CMOS Technology. 2000 IEEE International SOI Conference, Oct.2000
- 12 Fossum E R, Nixon R H, Schick D. A $37 \times 28\text{mm}^2$ 600k-pixel CMOS APS dental x-ray camera-on-chip with self-triggered readout.http://www.sscs.org/test./test/DATA/11_3.PDF, 15 MAY 98
- 13 Schwarz M, Ewe L, Hauschild R et al. Single chip CMOS imagers and flexible microelectronic stimulators for a retina implant system. 2000 Elsevier Science, Sensors and Actuators 83(2000) 40~46
- 14 Guidash R, Lee T, Lee P et al. A $0.6 \mu\text{m}$ CMOS pinned photodiode color imager technology. IEDM Tech Dig 1997; 927~929

(收稿日期: 20010808)

林凡 女 厦门大学物理系信息与电子技术方向硕士研究生, 主要从事温度传感器及图象传感器电路设计以及可编程ASIC系统设计的研究。